

## 中島克志氏 博士論文審査要旨

近年、環境、エネルギー、貴金属、農産物等商品に関わる取引が盛んになり、その価値評価やリスク管理が、実務上及び学問上の重要な問題となっている。中島氏の博士学位請求論文は、このような要請に応えるため、排出権、電力、天然ガス、原油、暖房油を具体例に取り、商品や派生証券の価格、またそれらを利用したリスク管理を理論と実証の両面から論じるものである。

この分野について、特に派生商品価格の決定に関するこれまでの先行理論研究では、各商品の価格を独立した変数として単独に扱うものがほとんどである。その一方、多くの実証研究が、複数の商品価格の間に何らかの関係が観察されることを指摘している。中島氏は、本論文において、この理論と実証の乖離を埋めるため、複数の商品価格の間に存在する関係を明示的に組みこんだ商品価格の新たな理論モデルを開発し、それらを実証的に検証する。

具体的には、本論文は、大きく二つのテーマに分けられる。第一のテーマは、CO<sub>2</sub>排出権と電力や天然ガス等の価格間を基礎とする、排出権の価格モデルの構築である。また、第二のテーマは、商品価格の間にある長期的な関係—共和分関係—を考慮した商品価格モデルの構築である。

第一のテーマで取り上げるCO<sub>2</sub>排出権とは、温暖化ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を排出する権利である。化石燃料を燃焼させ取りだしたエネルギーを利用するとき、CO<sub>2</sub>が排出される。よって、CO<sub>2</sub>を排出する権利はエネルギー商品に関わる条件付き請求権と考えられる。排出権価格とその派生証券に関する研究はいまだ進展中であり、これまでに様々な理論的な研究が発表されているが、それらの研究では排出権とその他の商品—例えば電力、石炭、天然ガス等—との関係については明示的なモデル化をしていない。一方、多くの実証研究は、排出権価格と電力、天然ガスの価格や気温の間に関係があることを指摘している。これらの研究を踏まえ、中島氏は、まず企業の利潤最大化条件から排出権とその他の商品価格の間に成り立つ関係を理論的に考察する。さらに、その関係を利用して、排出権価格を電力と天然ガスという複数の商品価格の派生証券として表現する理論モデルを構築し、データを用いてそのモデルの実証分析を行う。

一方、第二のテーマでは、他の商品価格との間に長期の関係が成り立つ商品の価格モデルを構築する。これまでの商品価格の理論モデルでは、各商品価格を独立に扱い、関連する他の商品価格との間で満たされる関係が考慮されることは無かった。一方、多くの実証研究で、複数の商品価格の間に長期の関係—共和分—が成り立つことが指摘されている。例えば、原油価格と原油から精製される（ガソリンや暖房油等の）商品価格に成り立つ関係がそれである。そこで、中島氏は、共和分を含む線形関係が複数の商品価格の間に成立することを明示的に取り入れた商品価格の理論モデルを構築し、原油と暖

原油のデータを用いて実証的に分析する。さらに、共和分関係がある複数の商品価格のスプレッドを原資産とする派生商品の価格式を導出し、実証結果に基づく数値分析によって、価値評価において長期的な関係を考慮することの重要性を指摘する。

以上のように、中島氏の研究は、関連する商品価格間に成り立つ関係を明示的に扱うという点で、商品価格の決定モデルにこれまでにない新しい結果を付け加えるものである。また、実証的に観察されて来た複数の商品価格間に成り立つ関係を、商品価格及びその派生証券価格の理論モデルに明示的に導入し、かつそれらを現実のデータを用いて検証したことは、今後この分野が発展するべき一つの方向を示したと言える。この意味で、中島氏の研究は学問的に高く評価され、既に本論文の一部は複数の査読付国際学術雑誌に採択されている。さらに、本論文の結果は、実務的にも環境及びエネルギー商品のリスク管理に関してより有用な方法を提供すると考えられる。このような観点から、中島氏の研究は、実務上の先端的問題に学問的方法論に基づく解決法を与えるという本研究科金融戦略・経営財務コースの目標を体現するものであり高い評価に値すると考えられる。よって審査員一同は、本博士学位請求論文が、中島氏に博士学位を与えるに十分値する内容を持つと判断する。

具体的には、本論文は、以下の章からなる。まず第1章は、研究の目的と本論文の構成を説明する。

続く第2章と第3章では、第一のテーマである、CO<sub>2</sub> 排出権と電力や天然ガス等の商品価格との関係を基礎とする排出権の価格モデルの構築を行う。まず、第2章は、「**Relations among Emission Allowance and Other Commodity Prices**」という題名で、企業の利潤最大化を通して排出権価格とその他の商品価格を関連付ける。例えば、電力会社は石炭や天然ガスを燃やして、二酸化炭素を排出させながら電力を発生させるが、このような企業の利潤の最大化から導かれる排出権価格とその他の商品価格に関する必要条件を導く。その結果、代表的なCO<sub>2</sub> 排出権取引システムであるEU-ETSと同様の仕組みのもと、 $t$  時点の排出権価格は最終時点  $T$  の排出権価格の現在価値であるという、排出権価格の通時的関係 (intertemporal relations) と、限界費用と限界収入が等しいことから得られる、排出権価格とその他商品価格の間に成り立つ同時的關係 (intratemporal relations) が導出される。

(同時的關係式は二種類導かれる。第一には、排出権価格が生産／排出比で調整されたアウトプット (例えば、電力) とインプット (例えば、石炭もしくは天然ガス) 価格の差となることが示される。第二には、排出権価格が生産／排出比で調整された二つのインプット (例えば、石炭と天然ガス) 価格の差—即ち燃料切替コスト (fuel switching cost) —となることが示される。)

さらに、最終時点  $T$  の排出権は罰金よりも大きくならないことを示し、Cobb-Douglas と CES 生産関数のもとでインプット価格の変化が排出権価格における価格差の関係に与える影響を分析する。

次に第3章は、「**Emission Allowance as a Derivative on Commodity-Spread**」という題名で、第2章で得られた排出権とその他の商品の間の関係を考慮しつつ、実際の価格やヘッジ計算に用いることができる排出権価格モデルを構築する。そのために、三つの仮定を置く。第一に、時点  $t$  の排出権価格が最終時点  $T$  の排出権価格の現在価値であるという通時的関係が成り立つこと。第二に、最終時点  $T$  の排出権価格は正であり、二つの商品価格の差か罰金のいずれか小さい方であるという同時的關係が成り立つこと。最後に、これらの商品価格が(商品価格モデルとしては標準的な) Gibson-Schwartz モデルに従うとすることである。これらの仮定のもと、排出権価格を他の商品価格のスプレッド・オプション価格として表わす理論モデルを導出し、排出権価格に内包されているオプション価値を分析する。また、排出権の先物及びオプションの価格公式を導出し、さらにコモディティ先物を用いた排出権のヘッジ戦略を構築する。

さらに、このモデルを排出権、電力、天然ガスの価格データに適合させ、それを用いてモデルが与える排出権価格、内包されたオプション価値、そして先物による排出権先物のヘッジ比率の数値解析を行なう。その結果、電力価格と天然ガス価格を用いた排出権の価格モデルが、実際の排出権価格をある程度説明していることが示される。また、数値解析では、排出権価格に内包されている罰金に対するオプションの価値(最終時点において排出権価格が罰金を上限とするというオプションの価値)は比較的大きく、排出権を評価する際に無視できない要素であることを指摘する。

第4章と第5章では、第二のテーマである、商品価格の間にある長期的な関係—共和分関係—を考慮した商品価格モデルの構築を行う。まず、第4章では、「**A Cointegrated Commodity Pricing Model**」という題名で、商品価格の標準的モデルである Gibson-Schwartz モデルを一般化し、共和分を含む価格間の線形関係を明示的に考慮した新しい商品価格モデルを構築する。具体的には、リスク中立確率のもとでドリフト項における無リスク利子率からの一時的な乖離が、コンベニエンス・イールドと複数の商品の対数価格の線形関係で表されるモデルを定式化する。

共和分を明示的に考慮した金融派生証券のモデルとしてはこれまでに Duan and Pliska (2004) が存在するが、Duan and Pliska (2004) は株価に対するモデルであり、商品価格を特徴付けるコンベニエンス・イールドを考慮していないため、商品価格には適用できない。そこで、コンベニエンス・イールドを考慮する Gibson-Schwartz モデルに共和分を加えたモデルを構築し、そのもとで先物とコール・オプションの価格公式を導出する。そして、この設定のもとでは、Duan and Pliska (2004) とは異なり、商品リターンのディフュージョン項が定数であっても商品の対数価格間の線形関係が派生

証券価格に影響を及ぼすことを示す。

複数の商品価格間の長期的な関係を考慮する商品価格モデルは近年注目を浴び、Cortazar, Milla, and Severino (2008)、Paschke and Prokopczuk (2009)、Casassus, Liu, and Tang (2011)等が、独立に類似の商品価格モデルを研究している。これらの研究と異なる本研究の特徴は、構築した商品価格の理論モデルが共和分を満たす十分条件を与えていることである。これは、モデルを推定する際に重要な結果となる。

さらに原油価格と暖房油価格の市場データを用いて構築した理論モデルの推定を行い、共和分を明示的に考慮した理論モデルがそうしない既存モデルと同等の適合度を持つことを示し、従来のモデルでは実証的にコンビニエンス・イールドとして扱われていたドリフト項の無リスク利子率からの一時的な乖離の一部が、共和分誤差として解釈できることを指摘する。また、この推定結果を用いて、満期の短い先物を用いた満期の長い先物のヘッジ戦略のシミュレーションを行い、共和分を考慮した場合のヘッジの効率性を評価する。

第5章は、「**Commodity Spread Option with Cointegration**」という題名で、第4章の結果に基づき、共和分を考慮した商品スプレッド・オプションのモデルを構築する。ここで、商品スプレッド・オプションとは二種類の商品の価格差を原資産とするオプションである。エネルギー会社の利益は製品と材料の商品価格の差になるため、商品スプレッド・オプションは企業のリスク・ヘッジの道具として用いられ、現実にNYMEXといった取引所でも商品スプレッド・オプションが取引されている。

一般のスプレッド・オプションと商品スプレッド・オプションに関してはこれまでに多くの研究が存在するが、商品価格間の関係を明示的に考慮したものはない。上記のCasassus, Liu, and Tang (2011)が商品価格の関係を考慮した商品スプレッド・オプション・モデルを提示し、モンテカルロ・シミュレーションによる数値解析を行っているが、本研究はヨーロッパ・コールの商品スプレッド・オプションの解析解を導出する。また、アメリカン・コールの商品スプレッド・オプションの解析的な近似式も示す。さらに、第4章で求めたモデルのパラメーター推定値を用いて、本章のモデルと、Gibson-Schwartz モデルを商品スプレッド・オプションに応用したShimko (1994) モデルを比較する。数値解析により、満期が長い商品スプレッド・オプションの価格については、共和分を考慮しないGibson-Schwartz 商品オプション・モデルによる価格が、ここで提案されている共和分を考慮するモデルの価格よりも著しく高くなることを示す。これは、共和分関係が商品価格を長期的な関係に引き戻すことで、長期的な商品価格差の拡大が抑制されるためと考えられ、実務における長期の商品スプレッド・オプションと捉えられる事業一例えば、発電や石油精製プラントへの投資等一の価値評価において、商品価格間の長期的な関係を考慮することの重要性が指摘される。

最後に第6章においては、今後の課題として、排出権価格に関して季節性、ジャンプ

あるいは確率的ボラティリティ等の要素の導入、共和分を持つ商品価格について観察不可能な現物価格ではなく観察可能な先物価格の間の共和分についてモデル化すること、またコンビニエンス・イールドの背景にある需要・供給構造のより明示的な導入や、構造変化による長期関係の変化の取り入れ等を指摘する。

以上のように、中島氏の研究は、複数の商品価格間の関係を明示的に扱う商品価格モデルを構築した新しい成果であり、商品価格分析の分野が今後発展するべき一つの方向に踏み出した点で高く評価される。審査においては、商品の現物価格やコンビニエンス・イールドを観察できないものとして扱い、パラメーターの推定に Kalman フィルターを利用する一方、派生証券の評価ではそれらの情報が利用可能であるように扱われていることが技術的問題点として指摘された。これは、現在のところほとんどの先行研究で用いられる手法であるが、この点は本分野の手法に関する今後の課題とすべきであろう。このような厳密に理論的な課題は残しつつも、本論文で示された複数の商品価格間の関係を明示的に扱うという新しいアプローチにより、商品価格モデルは、今後学問的のみならず実務的な意思決定の基盤としてもより有用なものに発展すると確信する。